

# 高温クリープ疲労条件下でのき裂発生・伝播・破断 寿命の評価法と構成方程式

著者	栗山 卓
号	1019
発行年	1985
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/9755">http://hdl.handle.net/10097/9755</a>

氏 名	くりやま 栗 山 卓
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 61 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学第二専攻
学 位 論 文 題 目	高温クリープ・疲労条件下でのき裂発生，伝播，破 断寿命の評価法と構成方程式
指 導 教 官	東北大学教授 大原 秀晴
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 大原 秀晴    東北大学教授 前川 一郎 東北大学教授 高橋 秀明    東北大学教授 阿部 博之 東北大学助教授 横堀 寿光

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 言

高温クリープ，疲労，クリープ疲労重畳条件下において使用される機器構造物の安全設計および安全性評価のためには，これらの条件における破壊に至るまでの時間あるいは繰返し数，すなわち破断寿命を正確に把握することが可能な方法の確立が重要となる。また，設計，用途によっては破断寿命ばかりか，き裂発生寿命，き裂伝播寿命の評価も必要となる。さらに，より正確な破断寿命特性を知る上でき裂発生の特性，き裂伝播特性を調べることは，基本的に重要である。しかしながら，従来，これらの問題に関して，かなり多くの研究が行われているが，それぞれ種々の難点を，含んでいる。そこで本論文は，SUS304 ステンレス鋼について，適確な実験と解析法によって，実験結果とよく合う構成方程式あるいは，評価パラメータを導き，新しい，実用上からも簡便な評価法を提案したものである。

### 第 2 章 高温クリープき裂発生挙動

本章では，相対切欠き開口変位(RNOD)なる新しい量を提案した。時間依存型高温破壊におけるき裂発生時の相対切欠き開口変位(RNOD<sub>c</sub>) $\Delta\phi_i/\phi_0$ ( $\Delta\phi_i=\phi_i-\phi_0$ ， $\phi_i$ :き裂発生時の切欠き開口

量,  $\phi_0$ : 初期切欠き開口量) は, 図1に示すように, 高温クリープ, 疲労, クリープ疲労重畳条件, 試験片板幅, 切欠き形状, 真空, 空気中等の雰囲気によらず, 一定の値をとる。また, 応力集中の大きい両側V型切欠き試験片の場合, き裂発生寿命の全寿命に対して占める割合  $t_i/t_f$  ( $t_i$ : き裂発生寿命,  $t_f$ : 破断寿命) は, ほぼ0.3~0.4であるが, 応力集中の小さい中央円形切欠き試験片では,  $t_i/t_f$  は, ほぼ0.7~0.8となってき裂発生寿命が全寿命の大部分を占める。これは, 応力集中の小

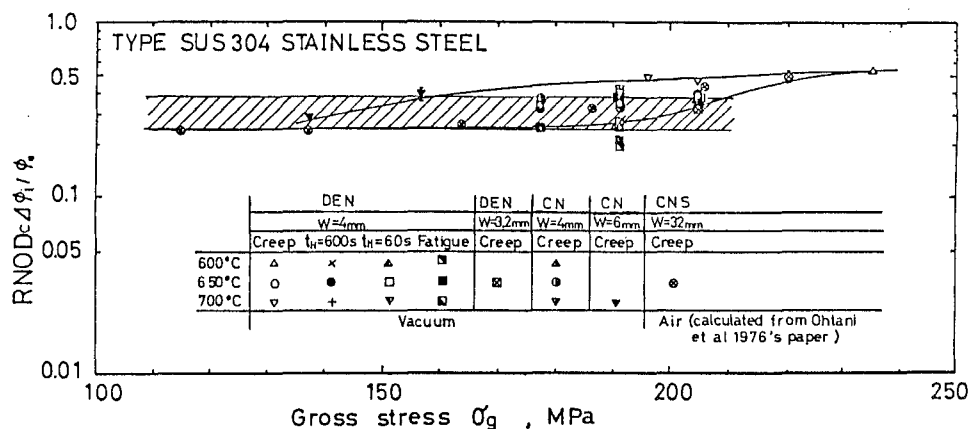


図1 き裂発生時の相対切欠き開口変位 (RNOD<sub>c</sub>)

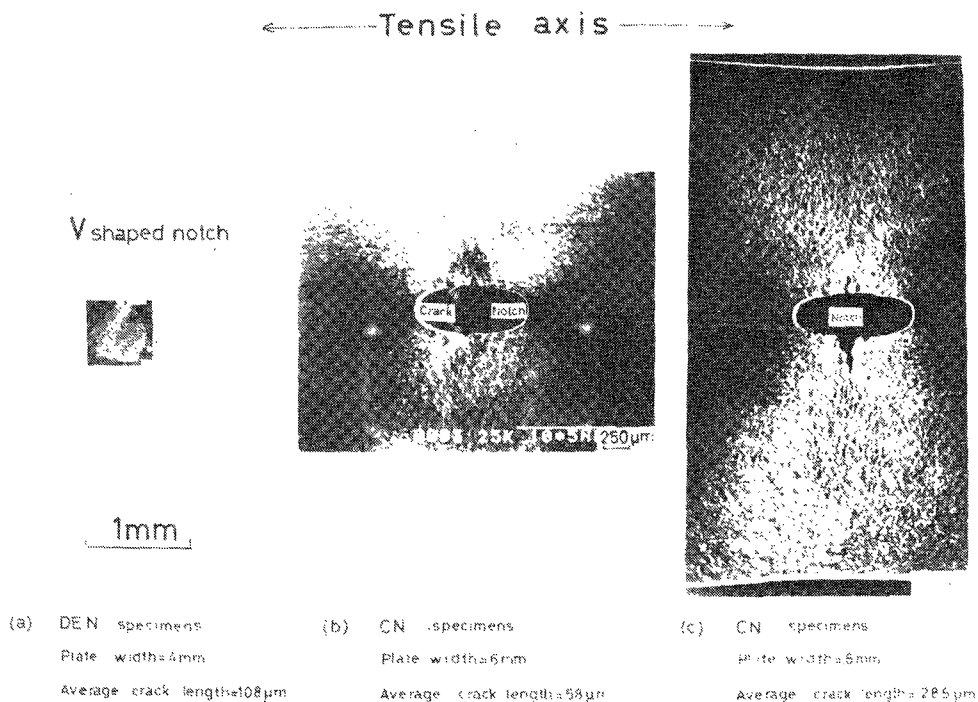


図2 き裂先端近傍の微視割れ領域の電顕観察結果

さい切欠きの場合図2に示す，き裂発生後広範囲に拡ったクリープ損傷である。粒界にそった微視割れ領域の中をき裂が進展するため，き裂は急速進展する。しかしながら，試験片板幅が広く，き裂発生までに，微視割れ領域が板幅全面に及んでいない時は，急速に破断せず，両側V型切欠き試験片と同様に安定成長する。すなわち，き裂が安定成長するか否かは，切欠き形状と試験片板幅に影響される。しかしながら，RNOD<sub>0</sub>は，このような定性的な相違によらず同じ値をとり，き裂発生のクライテリオンとして実用上有効である。

### 第3章 高温クリープき裂成長速度の各種パラメータの比較

負荷公称応力，応力拡大係数，試験片板幅および温度等の条件を変えた時，クリープき裂成長速度  $da/dt$  の切欠き開口変位速度  $\dot{\phi}$  による評価と，クリープ積分  $C^*$  による評価には，精度的に大きな差はみられなかった。これは  $C^*$  積分の構成因子である  $\phi$  が  $da/dt$  と対応していることに起因しており， $\sigma_{net}$  の効果は絶対値を変えるだけで  $C^*$  による  $da/dt$  の評価に対しては，大きな効果をもたない。また，応力拡大係数  $K$  による評価の場合，実験結果としてのばらつきのバンド幅は大きくなるが，応力，温度，試験片板幅，切欠き形状および加熱領域の変化に対して， $da/dt$  が一定の傾向をもって変化をする。

これらの評価パラメータとは別に，公称応力，温度，き裂長さ，さらに試験片板幅等を独立変数としたパラメータ  $Q^*$  を  $da/dt$  の評価パラメータとして提案した。図3に示すように，公称応力，試験片板幅および，温度等を広範囲に変えた  $da/dt$  に対して， $Q^*$  パラメータを用いることにより，

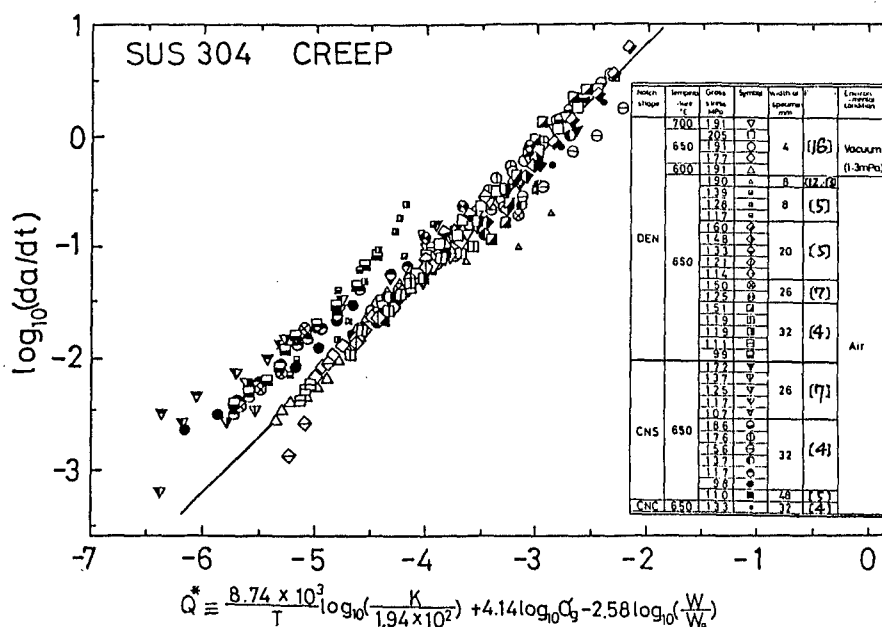


図3 応力，温度，試験片板幅および応力拡大係数を変化させた条件におけるクリープき裂成長速度  $da/dt$  の  $Q^*$  パラメータによる評価

精度よく評価できる。なお、切欠き先端形状が、き裂形，スリット形，ないしV形であれば，切欠き形状によらないことも明らかとなった。

第 4 章 高温クリープ，疲労，クリープ疲労重畳条件でのき裂発生，伝播，破断の各寿命特性

本章は，第 2 章，第 3 章で求めた，き裂発生，き裂成長速度のクライテリオンをもとにして，き裂発生，伝播，破断の各寿命の評価法を導いたものである。

クリープ疲労重畳条件における，き裂発生寿命，き裂伝播寿命の何れも，線形損傷則に従わず，とくにき裂発生寿命則の線形損傷則からのずれは，き裂伝播寿命則の場合より大きい。また，クリープ，疲労，クリープ疲労重畳条件で，き裂伝播寿命は，熱活性化過程として Arrhenius の式に従っている。活性化エネルギーはクリープ条件から疲労の重畳により，疲労条件へ移っていくにつれて減少する。他方，き裂発生寿命はクリープ優勢の条件でのみ Arrhenius 式に従う。以上のき裂発生寿命とき裂伝播寿命の特性の結果から，き裂伝播寿命に対しては，高温クリープ，疲労，クリープ疲労重畳条件下での，切欠き材のき裂伝播寿命と絶対温度との等価パラメータを提案し，図 4 に示すように，このパラメータによって，伝播寿命がよく評価できることを示した。破断寿命についても，同様なパラメータにより，よく評価できることも示した。き裂発生寿命の評価としては，相対切欠き開口変位 (RNOD) をクライテリオンとして用いて，図 5 に示すように，使用期間中に，2，3 の時点において RNOD を測定して，これを直線にて結び，外挿することによって，任意の時点でのき裂発生余寿命を，評価することができることを示した。

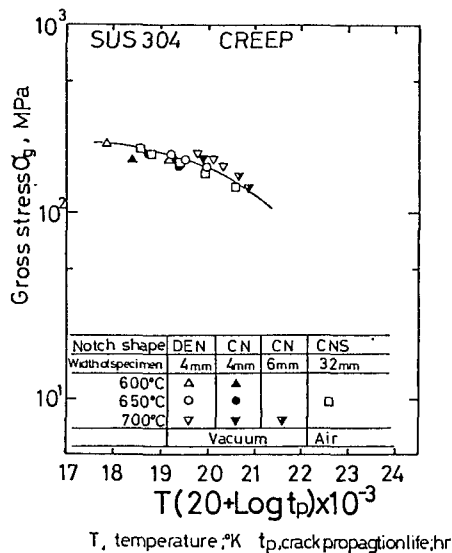


図 4 き裂伝播寿命の温度寿命等価パラメータ表示

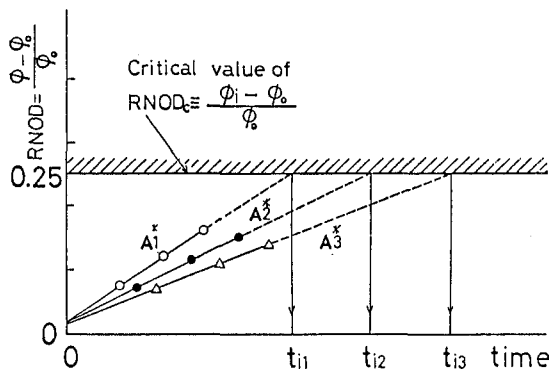


図 5 RNOD 法によるき裂発生余寿命の評価法

## 第 5 章 高温クリープ，疲労，クリープ疲労重畳条件でのき裂発生，伝播， 破断寿命に及ぼす繰返し速度効果および負荷波形効果

寿命におよぼす繰返し速度  $f$  効果は，き裂発生寿命では，始め  $f$  の減少に対して繰返し数依存型特性に近い形で減少するが， $f=0.1$  Hz で極小値をとった後，逆に増加し，その後漸減するものの，クリープ条件下の結果に近い値をとり，クリープのき裂発生機構に近づく。き裂伝播寿命は，繰返し数依存型特性とは一致せず，時間依存型機構が関与することによる寿命低下の効果はみられるが，き裂発生特性に比べて，時間依存型機構の効果は小さく時間寿命が長くなり，応力上昇時間  $t_R$  を増加させても，き裂伝播寿命はクリープ条件下の結果に近づかない。また，同一の  $f$  に対して応力上昇時間  $t_R$  と応力下降時間  $t_D$  を変えた非対称三角応力波形において， $t_R > t_D$  である slow-fast 波形は疲労挙動に近く，繰返し数依存型効果が強いのにに対して， $t_R > t_D$  である fast-slow 波形ではクリープ挙動に近く，時間依存型効果が強い。すなわち， $t_R$  効果は，応力速度効果と時間依存型効果の混合したもので，時間依存型機構を含む疲労効果であり， $t_D$  効果はクリープ効果に類似した，時間依存型効果と考えられる。さらに，応力保持時間  $t_H$  を疲労波形に付加すると，急速にクリープの結果に近づく，すなわち，応力保持時間効果はクリープ効果であり， $t_H$  を付加することにより，クリープの効果が加算的に加わる，クリープ型時間依存機構となる。

## 第 6 章 結 論

本章は，結論であり，第 2 章から第 5 章までの主要な結果を要約したものである。

## 審 査 結 果 の 要 旨

高温機器の開発・使用において、高温クリープ、疲労、クリープ・疲労重要条件下でのき裂の発生寿命や成長速度などのキャラクターゼーションや評価法の確立が緊要な課題となっている。従来、これらの問題に関して、かなり多くの研究が行われているが、夫々種々の難点を含んでいる。本論文はSUS 304 ステンレス鋼について適確な実験と解析法によって、実験結果とよく合う構成方程式あるいは評価パラメータを導き、新しい、実用上からも簡便な評価法を提案したもので全文6章よりなる。

第1章は緒論であり、本研究の背景と目的および概要を述べている。

第2章では、き裂発生時の相対切欠き開口変位(RNOD)なる新しい量を提案している。時間依存形高温破壊におけるき裂発生時のRNODは高温クリープ、疲労およびクリープ・疲労の重畳条件、試験片板幅、切欠形状、真空、空気中等の雰囲気によらず、また、き裂発生、成長挙動が異ってもほとんど一定の値をとることを見出している。したがってRNODがき裂発生のクライテリオンとして実用上有効であることを示した。

第3章では負荷公称応力、応力拡大係数、試験片板幅、および温度などを独立変数として表わした一つのパラメータによって、高温クリープき裂成長速度の表示式を導き、本式が多くの実験結果とよく一致することを示した。なお、切欠先端がき裂形、スリット形、ないしV形であれば切欠き形状にもよらないことも便利である。

第4章は第2章、第3章で求めたクライテリオンを基にしてき裂の発生、成長、破断寿命の評価法を導いたものである。すなわち、き裂の成長寿命と発生寿命の特性を明らかにし、高温クリープ、疲労およびクリープ・疲労重畳条件下での切欠材のき裂成長寿命と絶対温度との等価パラメータを提案し、このパラメータによって実験結果がよく整理されることを示した。全寿命についても同様であることも示している。発生寿命の評価としては、RNODをクライテリオンとして用い使用期間中に、二、三の時点においてRNODを測定して、これを直線にて結び外挿することによって、ある時点にて余寿命を評価することができることを示した。この評価法は新しいもので、しかも簡便である。

第5章は高温クリープ、疲労、クリープ・疲労重畳条件下での応力上昇時間  $t_R$ 、保持時間  $t_H$ 、下降時間  $t_D$  効果について明確にしたものである。本結果から  $t_R$  効果は疲労と関連する応力変動効果、 $t_H$  効果はクリープ効果、 $t_D$  効果はクリープと類似の時間依存形効果に律速されることがわかり、これは機器の稼動開始時間、停止時間の設定に重要な知見を与える。

以上要するに本論文は、高温クリープ、疲労、クリープ・疲労重畳条件下でのき裂発生成長挙動に関する多くの重要な知見を与えただけでなく、き裂発生寿命評価の新しい実用簡便式や、き裂成長速度の実用上簡単な独立変数による表示式を提案したものであり、機械工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。